● 实用成型技术 Practical Shaping Technology ●

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.02.017

25T–VD 炉脱气工艺研究与实践

杨 攀,王高社,陈凤博,唐 成,刘 刚,韩永杰,朱保亮
(宝鸡石油机械有限公司 热工分公司,陕西 宝鸡 721002)

摘 要:对于[H]含量要求较少的产品而言,由于传统的电弧炉 +LF 炉的冶炼工艺对减少钢中气体含量的作用效果不够明显,不能满足产品要求,为减少钢中气体含量,某公司冶炼车间特配备一台 25t-VD 真空精炼炉,根据炼钢和浇注过程各阶段钢液中气体含量的变化,对 25t-VD 真空精炼炉脱气参数和工艺进行优化,最终实现了钢中气体含量[O]≤30×10^{-4}%、[N]≤60×10^{-4}%、[H]≤2×10^{-4}%的目标,为产品的质量提供了保障,同时也减少了产品后期去氢时间,达到优化生产流程、节约能源、缩短生产周期的目的。

关键词:VD 真空精炼炉;浇注;气体含量;优化流程;生产周期

中图分类号: TF114 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2021)02-0138-04

Study on Degassing Process of 25T–VD Furnace

YANG Pan, WANG Gaoshe, CHEN Fengbo, TANG Cheng, LIU Gang, HAN Yongjie, ZHU Baoliang
(Thermal Engineering Branch of Baoji Petroleum Machinery Co., Ltd., Baoji 721002, China)

Abstract: For the products with less [H] content, the effect of the traditional smelting process of arc furnace+LF furnace on reducing the gas content in steel is not obvious which cannot meet the requirements of the products. A 25T-VD vacuum refining furnace is specially equipped in the smelting workshop of a company. The degassing parameters and process of the 25T-VD vacuum refining furnace are optimized according to the changes of gas content in molten steel in each stage of steelmaking and casting process, the goal of gas content in steel [N]≤60×10^{-4}%, [H]≤2×10^{-4}%, [O]≤30×10^{-4}% was finally achieved, which not only guaranteed the quality of the product, but also reduced the time of dehydrogenation in the later stage, to optimize the production process, save energy, shorten the production cycle.

Key words: VD vacuum refining furnace; pouring; gas content; optimization process; production cycle

某公司常用钢种的炼钢设备为电弧炉+LF 炉,但这种流程和工艺,不能有效降低合金钢中的气体含量,特别是钢中[H]含量高,如不进行扩散退火,生产的锻件就会产生白点,在大截面或大型锻件中极大危害。某公司根据产品的质量需求,安装调试了配备一台 25T-VD (Vacuum Degassing) 炉。通过对脱气前炼钢工艺、常炼钢种、浇注过程、操作习惯等因素进行分析,在实践中不断摸索、调整 VD 炉真空脱气工艺参数,最终总结出一套适合生产的真空脱气工艺,并达到了良好的脱气效果。

1 炼钢到浇注各阶段钢中气体含量的变化分析

熔化期炉气中的水蒸气和氮气在电弧的作用下加速分解,随着熔化温度不断提高,钢液吸收了大量的氢和氮;进入氧化期后,碳氧反应使钢液中氢和氮的含量逐渐降低,但钢液中氧含量增加;还原期熔池没有脱氢、脱氮的能力,还原渣、铁合金、脱氧剂等的加入及钢液和空气接触使钢液不可避免的增氢、增氮,但随着还原剂的不断加入及白渣的保持,钢液中氧含量有所降低;出钢及浇注过程中,由于钢液散流、钢包烘烤不良、浇注系统内的管砖或浇道砖等干燥不好、钢锭模内壁清理不干净等因素的影响造成钢液二次氧化现象,导致钢液易吸气。出钢时间、浇注时间越长,这种含量的变化越显著,具体变化情况见表 1。

表1 炼钢到浇注各阶段钢中气体含量变化情况
Tab.1 Variation of gas content in steel from steelmaking to casting

气体	熔化期气体含量 /×10^{-4}%	氧化期气体含量 /×10^{-4}%	还原期气体含量 /×10^{-4}%	浇注后气体含量 /×10^{-4}%
O	100~200	300~400	40~60	50~80
N	60~120	30~40	50~70	60~90
H	3.5~6.2	2.1~2.5	3.2~5.3	3.5~7.1

收稿日期: 2020-09-18
基金项目:2019 年中国石油天然气集团公司资助课题(2019B-4014)
作者简介: 杨 攀(1988-),陕西西安人,工学学士,工程师. 主要从事铸造行业电弧炉炼钢技术研究.
电话:15829403561, E-mail:yangpan@cnpc.com.cn

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2　VD 炉脱气影响因素及生产实践控制

2.1　真空度

根据 VD 炉脱气热力学分析，真空保持过程中真空度值越低(即 VD 炉内压力越低),越有利于钢液中气体的脱出。通过计算不同真空度下的氢含量，得出 VD 炉真空度与脱氢率的对应关系曲线见图 1。可以看出,在其他条件不变的情况下,VD 炉保持真空度越高,VD 炉脱氢率越高。因此,为了提高 VD 炉脱氢效果,真空度应该尽量高。但 VD 炉要实现高的真空度,要靠真空泵的抽气能力实现,抽气能力越大,真空泵采购成本也越高,根据试生产经验,当真空度≤67 Pa 时,经过 VD 炉真空处理的钢都能满足钢中氢含量 ≤2×10⁻⁴%的要求。25T-VD 炉真空泵共两组 6 台泵,各级泵的具体型号如下:一级罗茨泵电机功率:30 kW,1 800 r/min,60 Hz；二级罗茨泵电机功率:55 kW，3 600 r/min,60 Hz；三级螺杆泵电机功率:30 kW，真空泵抽气能力达 61 400 m^3/h，考虑工艺富余及特殊情况下的脱气效果,调整真空泵组在 6 min 内,将罐体及管道内的真空度降至 67 Pa,最低可至 20 Pa。在此技术参数下,通过计算真空泵抽气能力等参数对泵组提出了相关要求。设备试运行期间通过对抽气系统的不断改进，试生产阶段抽真空到达 67 Pa 时间 3~5 min，最短时间 3′05″，最低真空度 10.1 Pa,设备选用满足工艺要求。

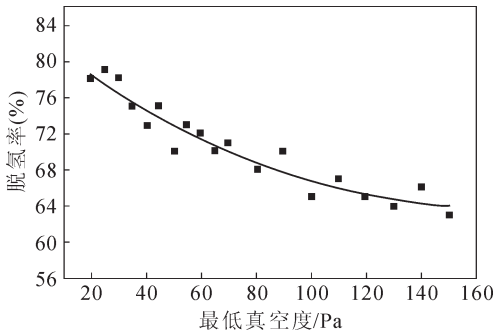


图 1　真空度与 VD 炉脱氢率的关系
Fig.1　Relationship between vacuum degree and dehydrogenation rate of VD furnace

2.2　炉渣碱度和渣量

理论表明炉渣的碱度越大,气体在渣中的溶解度就越高,有利于钢液真空脱气。VD 炉不同炉渣碱度和脱氢率关系见图 2。可以看出,高的炉渣碱度有利于 VD 炉脱氢率提高,但是效果有限。理论表明,当真空度处在 20~2 kPa 的范围内时,炉内熔渣非常容易冒涨与溢出,一旦熔渣出现溢出情况,操作工必须进行破空操作,以防大量钢渣损坏吹氩系统及相关设备,待溢出停止后再进行抽真空操作。因此,

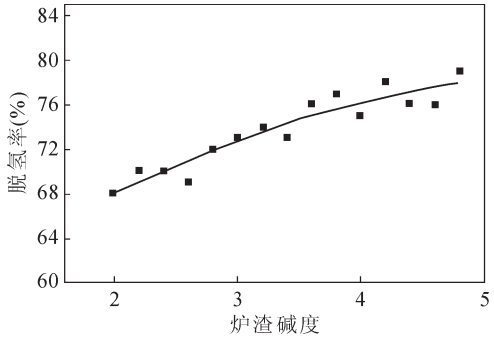


图 2　炉渣碱度与 VD 炉脱氢率的关系
Fig.2　Relationship between basicity of slag and dehydrogenation rate of VD furnace

过大的渣量会阻碍钢液裸露效果，影响钢中气体的快速溢出。渣量过大，真空过程中氩气流量控制不好,将会引起溢渣现象。针对采用旧的电弧炉+LF 炉工艺造渣方法引起渣量大的问题，现将 LF 炉渣量由 20 kg/t 减小至 10 kg/t，并严格控制钢渣黏度;同时在还原期造渣时，改进造渣工艺，减小精炼剂用量,增加碳粉用量,提高钢渣活度。

2.3　氩气流量及压力的影响

钢包底吹氩通过氩气泡将钢液中的气体携带、上浮,并在上浮过程中对钢液进行强烈搅拌,可以有效提高 VD 炉的真空脱气效果。因此,适宜的氩气流量可以保证钢包底吹氩效果。通过生产实践,钢包底吹氩气流量与 VD 炉脱氢效果的关系见图 3。可以看出,随着钢包底吹氩气流量增大,在其他条件相同的情况下,VD 炉的脱气率逐渐提高。从理论上讲,底吹氩气流量越大越好，但实际生产中，氩气流量过大,将导致钢液剧烈翻腾,加剧溢渣,甚至出现“溢钢”现象。另外,氩气流量过大,钢液搅拌效果越明显,导致温降增大,加大前工序升温负担。

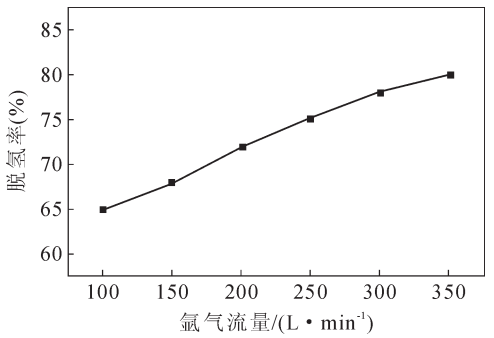


图 3　底吹氩气流量与脱氢率的关系
Fig.3　Relationship between argon flow rate and dehydrogenation rate

因此,要求观察钢液表面翻腾情况,实时调节氩气流量，使真空精炼过程中以钢液面裸露面积 300 mm 左右且不溢渣为宜。改进 VD 炉内氩气调节工艺，抽真空前调整氩气流量至钢液液面均匀波

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

动，真空度达到 67 Pa 以下时随着真空度的降低逐步提高氩气流量，直至达到出钢量的 3 倍。

2.4 脱气时间的影响

理论上，VD 炉真空保持时间越长，脱气效果越好，钢液脱气率也越高。在其他条件相同、高真空度保持时间不同情况下 VD 炉的脱气率见图 4。可以看出，随着高真空度保持时间增加，VD 炉的脱气率逐渐提高，但 18 min 后，真空保持时间的增加对 VD 炉脱气率的提升作用越来越小。但是，当保真空时间过长，钢液温降增大，这就要求前工序 LF 精炼、电弧炉出钢温度随之增大，势必造成前工序操作困难。通过试生产阶段实际检测，真空精炼时平均温降为 4~5 ℃/min，综合考虑实际操作难度、钢包耐材承受最高温度、浇注温度等因素，将 LF 炉出钢最高温度控制在 1 650~1 700 ℃之间，保真空时间控制在 12~18 min，这样既能最大限度地提高 VD 炉脱气率，又能保证前工序的可操作性。

2.5 钢中原始气体含量的影响

通过统计原始含量与 VD 炉真空脱气处理后的气体含量数据，以判断原始钢液中不同气体含量对 VD 炉脱气率的影响，具体结果见表 2。可以看出，其他条件不变的情况下，进 VD 炉前钢液气体含量越低，真空处理后钢液中的气体含量也越低；进 VD 炉前钢液中原始气体含量越高，处理后钢液中的气体含量也越高。因此，将进 VD 炉前钢液中气体含量控制在合理范围内是保证 VD 真空脱气效果的关键。

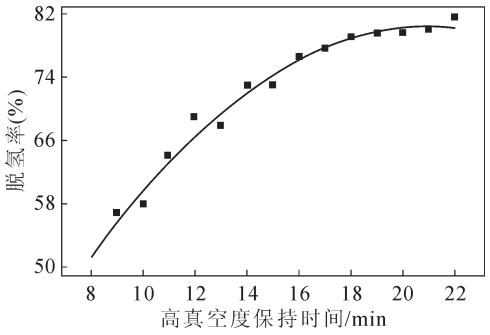


图 4 高真空度保持时间与脱氢率的关系

Fig.4 Relationship between high vacuum holding time and dehydrogenation rate

利用优化后的工艺规程，对连续 10 炉钢液进行 VD 炉脱气试制，并对钢液脱气前后取样进行对比分析，统计结果列于表 3。可以看出，通过工艺改进，钢液经 VD 脱气后，钢中 H 平均含量 1.41×10^{-4}%，O 平均含量 28×10^{-4}%、N 平均含量 36×10^{-4}%，均满足工艺要求。由此证明改进后的工艺是可靠的、操作是可行的。

3 产品跟踪验证

通过前期 VD 炉真空脱气工艺的理论研究与工艺改进，并通过对 VD 前后钢中气体含量的检测，表明改进后的 VD 炉真空精炼工艺满足真空钢各项气体指标要求，为进一步检验产品质量，验证 VD 炉脱氢效果，特对研制的含 Ni 新材料 ZGBS10 钢、627 炉齿圈用 42CrMoT 钢、646 炉液缸用 30CrMoA 钢进行钢锭不去氢工艺的质量验证，具体数据见表 4。

表2 钢中原始气体含量与VD脱气率的关系

Tab.2 Relationship between original gas content and VD degassing rate in steel

炉号	气体	进 VD 前含量 /×10⁻⁴%	进 VD 后含量 /×10⁻⁴%	脱气率(%)	保持时间 /min
562	O/N/H	67/51/3.1	29/35/1.5	56.7/31.4/51.6	15
578	O/N/H	74/58/4.6	32/42/1.9	56.8/27.3/58.7	15
591	O/N/H	60/47/2.8	24/29/1.0	60/38.3/64.3	15
612	O/N/H	58/69/3.6	31/50/1.5	46.6/27.5/58.3	15

表3 VD炉脱气前后取样分析结果

Tab.3 Sampling analysis results of VD furnace before and after degassing

炉号	气体	VD 前含量 /×10⁻⁴%	VD 后含量 /×10⁻⁴%	保持时间 /min
695	O/N/H	66/50/3.2	23/31/1.2	15
702	O/N/H	73/56/4.3	26/35/1.3	15
715	O/N/H	63/46/2.9	28/36/1.2	15
721	O/N/H	56/66/3.5	29/34/1.6	15
732	O/N/H	65/53/3.6	25/30/1.2	15
741	O/N/H	63/51/3.5	32/36/1.8	15
756	O/N/H	56/48/3.1	28/37/1.4	15
764	O/N/H	62/55/3.1	31/42/1.9	15
822	O/N/H	60/46/3.2	28/36/1.3	15
831	O/N/H	63/53/3.4	30/43/1.2	15

表4 锻件无去氢工艺下产品锻前锻后气体含量分析结果

Tab. 4 analysis result of gas content before and after forging under no dehydrogenation process

炉号	气体	锻造前钢锭气体含量 /×10⁻⁴%	产品气体含量 /×10⁻⁴%	备注
627	O/N/H	18/39/0.7	29/54/0.6	42CrMoT
646	O/N/H	21/38/0.9	24/50/0.7	30CrMoA

表5 铸件无去氢工艺下产品热处理前后气体含量分析结果

Tab.5 Analysis results of gas content before and after heat treatment of casting without dehydrogenation process

炉号	气体	热处理前铸件气体含量 /×10⁻⁴%	热处理后铸件气体含量 /×10⁻⁴%	备注
427	O/N/H	20/36/0.8	25/51/0.6	ZGBS10

（下转第 158 页）

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

pounds in Cast A356 Based Alloy with Different Fe Contents[J]. Materials Transactions, 2013, 54(8): 1484-1490.

[15] 刘涛,丁海,赵建华. Mn 对铸造 A356 合金中 Fe 相形貌的影响和相图分析[J]. 特种铸造及有色合金, 2013, 33(9): 864-867.

[16] Gao T, Wu Y, Li C, et al. Morphologies and growth mechanisms of α-Al (FeMn)Si in Al-Si-Fe-Mn alloy [J]. Materials Letters, 2013, 110: 191-194.

[17] 宋东福,王顺成,郑开宏. Mn/Fe 摩尔比对 A356 铸造铝合金富铁相形态的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(7): 1832-1838.

[18] Abedi K, Emamy M. The effect of Fe, Mn and Sr on the microstructure and tensile properties of A356-10% SiC composite[J]. Materials Science & Engineering A, 2010, 527 (16-17): P. 3733-3740.

[19] Farkoosh A R, Chen X G, Pekguleryuz M. Dispersoid strengthening of a high temperature Al-Si-Cu-Mg alloy via Mo addition[J]. Materials Science & Engineering A, 2015, a620(jan.3): 181-189.

[20] 李润霞,于洪江,袁晓光,等. Cr 和 Mo 对过共晶 Al-Si 合金组织与性能的影响[J]. 铸造, 2009(8): 72-75.

[21] Farkoosh A R, Grant Chen X, Pekguleryuz M. Interaction between molybdenum and manganese to form effective dispersoids in an Al-Si-Cu-Mg alloy and their influence on creep resistance[J]. Materials Science & Engineering A, 2015, 627: 127-138.

[22] Jin L , Liu K , Chen X G . Evolution of Fe-Rich Intermetallics in Al-Si-Cu 319 Cast Alloy with Various Fe, Mo, and Mn Contents [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2019, 50(4).

[23] Rakhmonov J, Timelli G, Bonollo F. The Effect of Transition Elements on High-Temperature Mechanical Properties of Al-Si Foundry Alloys-A Review [J]. Advanced Engineering Materials, 2016, 18(7): 1096-1105.

[24] 张传正. 大型轮毂用高强铸造铝合金制备技术研究[D]. 北京有色金属研究总院, 2018.

[25] Colombo M, Gariboldi E, Morri A. Influences of different Zr additions on the microstructure, room and high temperature mechanical properties of an Al-7Si-0.4Mg alloy modified with 0.25%Er[J]. Materials Science & Engineering A, 2018, 713(JAN.24): 151-160.

[26] Rao A K P. Influence of Vanadium on the Microstructure of A319 Alloy [J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2011, 64 (4-5): 447-451.

[27] Liu G, Blake P, Ji S. Effect of Zr on the high cycle fatigue and mechanical properties of Al-Si-Cu-Mg alloys at elevated temperatures [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 809: 151795.

[28] Shaha S K, Czerwinski F, Kasprzak W, et al. Ageing characteristics and high-temperature tensile properties of Al-Si-Cu-Mg alloys with micro-additions of Cr, Ti, V and Zr[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 652: 353-364.

[29] Ludwig T H, Schaffer P L, Arnberg L. Influence of Vanadium on the Microstructure of A356 Foundry Alloy [M]. John Wiley & Sons, Inc., 2013.

[30] Mohamed A M A, Samuel A M, Samuel F H, et al. Influence of additives on the microstructure and tensile properties of near-eutectic Al-10.8% Si cast alloy [J]. Materials & Design, 2009, 30(10): 3943-3957.

[31] Shamsuzzoha M, Hogan L M. The crystal morphology of fibrous silicon in strontium-modified Al-Si eutectic [J]. Philosophical Magazine A, 1986, 54(4): 459-477.

[32] 长海博文, 吴永福. Al-Si 系合金共晶 Si 变质处理的研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(9): 924-930.

[33] Casarotto F, Franke A J, Franke. High-pressure die-cast (HPDC) aluminium alloys for automotive applications[J]. Advanced Materials in Automotive Engineering, 2012: 109-149.

[34] Hu, Zuqi, Wan, et al. Microstructure and mechanical properties of high strength die-casting;Al-wMg-Si-Mn alloy[J]. Materials & Design, 2013, 46(3):451-456.

[35] 孙浩然,赵海东,代航,等. Si 元素对挤压铸造 Al-5Mg-xSi 合金微观组织的影响 [J]. 特种铸造及有色合金,2019, 39(3): 266-270.

[36] 刘勇,陈超,张振富,等. 不同 Mg、Si 质量比对压铸铝合金组织与性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(11): 1179-1182.

[37] Ji S, Yang W, Gao F, et al. Effect of iron on the microstructure and mechanical property of Al-Mg-Si-Mn and Al-Mg-Si diecast alloys [J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 564: 130-139.

(上接第 140 页)

通过检测对比,氢含量均满足产品要求,表明了经过 VD 真空精炼的钢在下工序不去氢情况下,氢含量仍能满足相关要求,同时通过加工后超声波探伤,未发现疏松、白点及缩孔等质量问题,进一步验证了工艺的可靠性。

4 结论

通过对机械泵组式的 VD 炉真空脱气工艺的研究与不断优化, 经 VD 炉真空脱气和保护浇注生产的钢,其气体含量[O] ≤28×10^{-4}%、[N]≤36×10^{-4}%、[H] ≤1.4×10^{-4}%,达到研究目标。

经过 VD 炉处理的钢锭生产锻件, 取消某公司传统的使用自炼钢锭生产锻件的去氢工序, 优化了生产流程,大大缩短了生产周期,节约了燃气消耗。

参考文献:

[1] 李玉华,刘茂文,常福华,等. 高质量锻钢 VD 炉真空脱气工艺[J]. 炼钢,2009 (4):26-28.

[2] 赵喜伟,陈文杰. VD 炉脱氢率的影响因素及工艺优化[J]. 宽厚板,2019(2):27-30.

[3] 邱绍岐,祝桂华. 电炉炼钢原理及工艺[M]. 北京:化学工业出版业,2015.

[4] 俞海明. 电炉钢液的炉外精炼技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2010.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net